

RAPORT

Z OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI METODĄ MECHANISTCZNO-EMPIRYCZNA

Autor mgr inż. Marek Tokarz

Projekt ROZBUDOWA I PRZEBUDOWA DROGI POWIATOWEJ
NR 0264T O DŁUGOŚCI OK. 4.6 KM NA ODCINKU
WYSTĘPY – SKORKÓW – LEŚNICA

Data 2019-05-16

Zamawiający ZARZĄD DRÓG POWIATOWYCH
ul. Jędrzejowska 81
29-100 Włoszczowa

Pracownia projektowa EXAL Marek Tokarz

EXAL - Marek Tokarz
ul. Broniewskiego 16, 39-400 Tarnobrzeg
mail: biuro@exal.biz, tel: 504 102 608

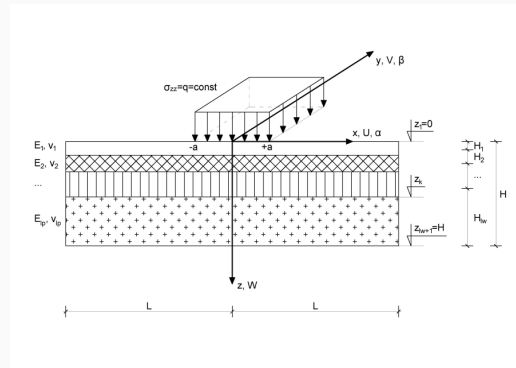
OPIS METODY OBLICZANIA STANU NAPRĘŻEŃ, ODKSZTAŁCEŃ I PRZEMIESZCZEŃ

W obliczeniach współpracy nawierzchni drogowej z podbudową i niżej występującym gruntem rodzimym zastosowano model warstw sprężystych, obciążonych statycznie pojazdem na stopie najwyższej warstwy. Ocena pracy i wytrzymałości podłoża przeprowadzono z użyciem wyliczonych przemieszczeń, odkształceń i naprężeń we wnętrzu oraz na stykach warstw. Ponieważ dla ośrodków ciągłych, uwarstwionych poziomo, złożonych z kilku jednorodnych, izotropowych warstw sprężystych, nie istnieją ściśle rozwiązania teorii sprężystości (dla istotnych obciążeń powierzchni ośrodką), użyta została metoda przybliżona.

Zastosowana metoda warstw skończonych należy do grupy przybliżonych metod analitycznych, cechując się ścisłym rozwiązaniem zagadnienia w każdym punkcie wewnątrz ośrodka uwarstwowanego oraz przybliżonym odwzorowaniem obciążenia brzegu ośrodka (nawierzchni). Błąd przybliżenia w obliczeniach uznawany jest za nieistotnie mały, co możliwe jest poprzez wykorzystanie odpowiednio dużej liczby wyrazów rozwinięcia w szereg. Istota metody polega na dokładnym rozwiązywaniu zagadnienia dla obciążeń brzegu przyjętych jako okresowa funkcja trygonometryczna (jej ściśle rozwiązania istnieją w postaci zamkniętej), a następnie na złożeniu od kilkudziesięciu do kilkuset takich rozwiązań.

Podstawą metody jest twierdzenie Fouriera o rozwijaniu funkcji w szereg trygonometryczny: ponieważ przybliżeniem rzeczywistego obciążenia nawierzchni jest szereg funkcji trygonometrycznych to stosując zasadę superpozycji, przybliżeniem rozwiązania jest suma tych szczególnych rozwiązań dla obciążenia o kształcie okresowych funkcji trygonometrycznych.

W przeprowadzonych obliczeniach nawierzchnia jest obciążona siłą pionową, równomiernie rozłożoną na obszarze prostokątnym. Na granicach warstw występuje pełne ich zespolenie (ciągłość przemieszczeń), a na spodzie najniższej warstwy nie występuje osiadanie. Parametrami są (w każdej warstwie): grubość H_k , moduł Younga E oraz współczynnik Poissona ν_k . Obliczane są przemieszczenia, naprężenia i odkształcenia na granicach warstw, przy czym niektóre z naprężeń i odkształceń są różne nad granicą i pod granicą warstw (nieciągłość).



II METODA OBLICZANIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Stan naprężeń i odkształceń w konstrukcji nawierzchni określono metodami analitycznymi z wykorzystaniem modelu warstw skończonych. Trwałość zmęczeniową projektowanej konstrukcji nawierzchni określono stosując:

- kryterium spekań zmęczeniowych – wg AASHTO 2004,
- kryterium deformacji strukturalnych – wg Instytutu Asfaltowego.

Dla nawierzchni półsztywnych zastosowano kryterium spekań warstw związanych spoiwem hydraulicznym (kryterium Dempsey'a) oraz hipotezę Minera dla określenia szkody zmęczeniowej.

1 KRYTERIUM SPEKAŃ ZMĘCZENIOWYCH

Trwałość zmęczeniowa dla kryterium spekań warstw asfaltowych obliczona wg AASHTO 2004:

$$N = D_{FC} \cdot 7,3557 \cdot (10^{-6}) \cdot C \cdot k'_1 \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{3,9492} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{1,281}$$

N - liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spekań zmęczeniowych, na FC procentach całkowitej powierzchni pasa ruchu [osi/pas/okres obliczeniowy]

E - moduł Younga najniższej warstwy asfaltowej [MPa]

D_{FC} - szkoda zmęczeniowa wyrażona jako ułamek dziesiątej, odpowiadająca założonej ilości spekań zmęczeniowych FC oraz grubości warstw asfaltowych h_{ac}

$$D_{FC} = \frac{1}{100} \cdot 10^{\ln\left(\frac{100}{FC} - 1\right) \cdot \frac{1}{C_2} + 2}$$

FC - założona ilość spekań zmęczeniowych [%]

C_2 - współczynnik zależny od grubości warstw asfaltowych

$$C_2 = -2,40874 - 39,748 \cdot \left(1 + \frac{h_{ac}}{2,54}\right)^{-2,856}$$

h_{ac} - grubość wszystkich warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych [cm]

k'_1 - parametr określony w procesie kalibracji, zależny od grubości warstw asfaltowych

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 1,374 \cdot h_{ac})}}}$$

ϵ_t - odkształcenia rozciągające poziome w osi obciążenia na dolnej powierzchni najniższej warstwy asfaltowej [m/m]

C - współczynnik zależny od właściwości objętościowych mieszanki mineralno-asfaltowej

$$C = 10^M \quad M = 4,84 \cdot \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69\right)$$

V_b - zawartość objętościowa asfaltu [v/v %]

V_a - zawartość objętościowa wolnej przestrzeni [v/v %]

2 — KRYTERIUM DEFORMACJI STRUKTURALNYCH

Zależność pomiędzy dopuszczalną liczbą powtarzalnych obciążeń N do powstania krytycznej deformacji strukturalnej, a odkształceniem pionowym na poziomie podłoża gruntowego ϵ_p :

$$\epsilon_p = k \cdot (1/N_s)^m$$

Wzór kryterium deformacji strukturalnych rozpatrywanej konstrukcji nawierzchni po przekształceniu:

$$N_s = \frac{1}{\sqrt[m]{\frac{\epsilon_p}{k}}}$$

- N - liczba dopuszczalnych obciążeń do wystąpienia krytycznej deformacji strukturalnej w konstrukcji nawierzchni
- k,m - współczynniki doświadczalne:

$$k = 1,05 \cdot 10^{-2}$$

$$m = 0,223$$

- ϵ_p - wartość pionowego odkształcenia na powierzchni podłoża gruntowego w osi obciążenia

3 — KRYTERIUM SPĘKAŃ PODBUDOWY ZWIĄZANEJ SPOIWEM HYDRAULICZNYM (KONSTRUKCJE PÓLSZTYWNE)

Obliczenia trwałości zmęczeniowej konstrukcji półsztywnej przeprowadzono stosując hipotezę Minera dla sumowania się szkód zmęczeniowych w każdej fazie pracy konstrukcji:

$$N = N_I + N_{II} \cdot \left(1 - \frac{N_I}{N_{Ia}}\right)$$

- N_{Ia} - trwałość zmęczeniowa przy założeniu, że podbudowa zasadnicza związana spoiwem hydraulicznym pracuje w Fazie I (brak spękań)
- N_{II} - trwałość zmęczeniowa przy założeniu, że podbudowa zasadnicza związana spoiwem hydraulicznym pracuje w Fazie II (spękana w formie małych bloków)
- N_I - liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych w warstwie stabilizowanej spoiwem hydraulicznym wg kryterium Dempsey'a:

$$N_I = 10^{11,782 - 12,1212 \left(\frac{\sigma_t}{R_{zg}}\right)}$$

- δ_t - maksymalne naprężenia poziome wywołane na spodzie warstwy podbudowy stabilizowanej spoiwami hydraulicznymi [MPa]
- R_{zg} - wytrzymałość na zginanie warstwy związanej spoiwem hydraulicznym [MPa]

III — ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ

1 — OBCIĄŻENIE RUCHEM

Kategoria Ruchu:	<input type="text" value="KR4"/>
Liczba dopuszczalnych osi obliczeniowych dla kategorii ruchu:	<input type="text" value="2,5-7,3 mln osi"/>
Okres obliczeniowy:	<input type="text" value="20lat"/>

2 — PARAMETRY OBCIĄŻENIA

Siła:	<input type="text" value="50.0 kN"/>
Ciśnienie kontaktowe:	<input type="text" value="0.85 MPa"/>
Pole powierzchni obciążenia:	<input type="text" value="0.0147 m2 (0.1213 m x 0.1213 m)"/>
Oś obciążenia w punkcie:	<input type="text" value="X=0, Y=0"/>

IV — WYNIKI

1 — WYNIKI - KONSTRUKCJA 1

KONSTRUKCJA

Warstwa	Moduł Younga E [MPa]	Współczynnik Possiona v	Grubość H [m]	Zawartość asfaltu [%]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]
Warstwa ściernalna z mastyksu grysowego (SMA) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	7 300.00	0.30	0.05	16.00	3.00
Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	10 300.00	0.30	0.08	11.50	6.00
Warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	9 800.00	0.30	0.07	10.50	7.00
Podbudowa pomocnicza z mieszanki niezwiązanej	250.00	0.30	0.25		
Warstwa mrozochronna z gruntu niewysadzinowego	200.00	0.30	0.15		
Warstwa podłoża gruntowego G1	80.00	0.35	podłoże gruntowe		

PRZEMIESZCZENIE

Warstwa		W	V	U
Warstwa ściernalna z mastyksu grysowego (SMA) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	0.0002549	0.0000000	0.0000000
	spąg	0.0002535	0.0000000	0.0000000
Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	0.0002535	0.0000000	0.0000000
	spąg	0.0002505	0.0000000	0.0000000
Warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	0.0002505	0.0000000	0.0000000
	spąg	0.0002462	0.0000000	0.0000000
Podbudowa pomocnicza z mieszanki niezwiązanej	strop	0.0002462	0.0000000	0.0000000
	spąg	0.0002001	0.0000000	0.0000000
Warstwa mrozochronna z gruntu niewysadzinowego	strop	0.0002001	0.0000000	0.0000000
	spąg	0.0001800	0.0000000	0.0000000
Warstwa podłoża gruntowego G1	strop	0.0001800	0.0000000	0.0000000
	spąg	0.0000000	0.0000000	0.0000000

NAPRĘŻENIE

Warstwa		SIZZ	SIZY	SIZX	SIYY	SIYX	SIXX
Warstwa ścieralna z mastyksu grysowego (SMA) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	-0.8515982	0.0000000	0.0000000	-1.3966267	0.0000000	-1.3966267
	spąg	-0.7653616	0.0000000	0.0000000	-0.7323573	0.0000000	-0.7323573
Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	-0.7653616	0.0000000	0.0000000	-0.8985265	0.0000000	-0.8985265
	spąg	-0.3245096	0.0000000	0.0000000	0.2781654	0.0000000	0.2781654
Warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	-0.3245096	0.0000000	0.0000000	0.2579110	0.0000000	0.2579110
	spąg	-0.0666088	0.0000000	0.0000000	1.2647009	0.0000000	1.2647009
Podbudowa pomocnicza z mieszanki niezwiązanej	strop	-0.0666088	0.0000000	0.0000000	0.0044444	0.0000000	0.0044444
	spąg	-0.0247991	0.0000000	0.0000000	0.0135953	0.0000000	0.0135953
Warstwa mrozoochronna z gruntu niewysadzinowego	strop	-0.0247991	0.0000000	0.0000000	0.0087506	0.0000000	0.0087506
	spąg	-0.0165744	0.0000000	0.0000000	0.0147423	0.0000000	0.0147423
Warstwa podłoża gruntowego G1	strop	-0.0165744	0.0000000	0.0000000	0.0004857	0.0000000	0.0004857
	spąg	-0.0025911	0.0000000	0.0000000	-0.0013952	0.0000000	-0.0013952

ODKSZTAŁCENIE

Warstwa		EPSIZZ	EPSIZY	EPSIZX	EPSIYY	EPSIYX	EPSIXX
Warstwa ścieralna z mastyksu grysowego (SMA) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	-0.0000019	0.0000000	0.0000000	-0.0000989	0.0000000	-0.0000989
	spąg	-0.0000447	0.0000000	0.0000000	-0.0000388	0.0000000	-0.0000388
Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	-0.0000220	0.0000000	0.0000000	-0.0000388	0.0000000	-0.0000388
	spąg	-0.0000477	0.0000000	0.0000000	0.0000284	0.0000000	0.0000284
Warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	-0.0000489	0.0000000	0.0000000	0.0000284	0.0000000	0.0000284
	spąg	-0.0000842	0.0000000	0.0000000	0.0000924	0.0000000	0.0000924
Podbudowa pomocnicza z mieszanki niezwiązanej	strop	-0.0002771	0.0000000	0.0000000	0.0000924	0.0000000	0.0000924
	spąg	-0.0001318	0.0000000	0.0000000	0.0000678	0.0000000	0.0000678
Warstwa mrozoochronna z gruntu niewysadzinowego	strop	-0.0001502	0.0000000	0.0000000	0.0000678	0.0000000	0.0000678
	spąg	-0.0001271	0.0000000	0.0000000	0.0000765	0.0000000	0.0000765
Warstwa podłoża gruntowego G1	strop	-0.0002114	0.0000000	0.0000000	0.0000765	0.0000000	0.0000765
	spąg	-0.0000202	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000

2 WYNIKI - KONSTRUKCJA 2

KONSTRUKCJA

Warstwa	Moduł Younga E [MPa]	Współczynnik Possiona v	Grubość H [m]	Zawartość asfaltu [%]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]
Warstwa ścieralna z mastyksu grysowego (SMA) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	7 300.00	0.30	0.05	16.00	3.00
Warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	9 800.00	0.30	0.08	10.50	7.00
Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki mineralono-cementowo-emulsyjnej	1 500.00	0.30	0.21		
Warstwa podłoża gruntowego G1	80.00	0.35	podłoże gruntowe		

PRZEMIESZCZENIE

Warstwa		W	V	U
Warstwa ścieralna z mastyksu grysowego (SMA) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	0.0002778	0.0000000	0.0000000
	spąg	0.0002769	0.0000000	0.0000000
Warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	0.0002769	0.0000000	0.0000000
	spąg	0.0002724	0.0000000	0.0000000
Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki mineralono-cementowo-emulsyjnej	strop	0.0002724	0.0000000	0.0000000
	spąg	0.0002436	0.0000000	0.0000000
Warstwa podłoża gruntowego G1	strop	0.0002436	0.0000000	0.0000000
	spąg	0.0000000	0.0000000	0.0000000

NAPRĘŻENIE

Warstwa		SIZZ	SIZY	SIZX	SIYY	SIYX	SIXX
Warstwa ścieralna z mastyksu grysowego (SMA) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	-0.8515982	0.0000000	0.0000000	-1.5896869	0.0000000	-1.5896869
	spąg	-0.7237053	0.0000000	0.0000000	-0.6740809	0.0000000	-0.6740809
Warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	-0.7237053	0.0000000	0.0000000	-0.7987116	0.0000000	-0.7987116
	spąg	-0.2976843	0.0000000	0.0000000	0.9853300	0.0000000	0.9853300
Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki mineralono-cementowo-emulsyjnej	strop	-0.2976843	0.0000000	0.0000000	0.0427642	0.0000000	0.0427642
	spąg	-0.0289210	0.0000000	0.0000000	0.2712957	0.0000000	0.2712957
Warstwa podłoża gruntowego G1	strop	-0.0289210	0.0000000	0.0000000	0.0007212	0.0000000	0.0007212
	spąg	-0.0028076	0.0000000	0.0000000	-0.0015118	0.0000000	-0.0015118

ODKSZTAŁCENIE

Warstwa		EPSIZZ	EPSIZY	EPSIZX	EPSIYY	EPSIYX	EPSIXX
Warstwa ścieralna z mastyksu grysowego (SMA) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	0.0000140	0.0000000	0.0000000	-0.0001174	0.0000000	-0.0001174
	spąg	-0.0000437	0.0000000	0.0000000	-0.0000349	0.0000000	-0.0000349
Warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	-0.0000249	0.0000000	0.0000000	-0.0000349	0.0000000	-0.0000349
	spąg	-0.0000907	0.0000000	0.0000000	0.0000795	0.0000000	0.0000795
Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki mineralono-cementowo-emulsyjnej	strop	-0.0002156	0.0000000	0.0000000	0.0000795	0.0000000	0.0000795
	spąg	-0.0001278	0.0000000	0.0000000	0.0001324	0.0000000	0.0001324
Warstwa podłoża gruntowego G1	strop	-0.0003678	0.0000000	0.0000000	0.0001324	0.0000000	0.0001324
	spąg	-0.0000219	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000

V — TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA KONSTRUKCJI

1 — KONSTRUKCJA 1

Kryterium spękań zmęczeniowych
Kryterium deformacji strukturalnych

N = 5 826 715 osi 100kN/pas/20lat

N_s = 40 316 372 osi 100kN/pas/20lat

2 — KONSTRUKCJA 2

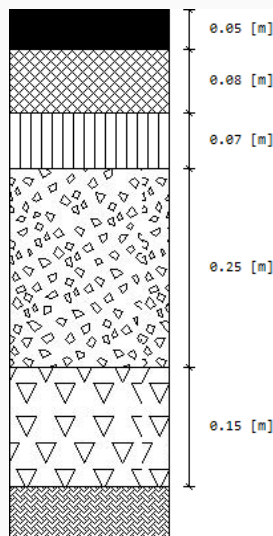
Kryterium spękań zmęczeniowych
Kryterium deformacji strukturalnych

N = 11 826 652 osi 100kN/pas/20lat

N_s = 3 366 147 osi 100kN/pas/20lat

VI — WYNIKI PORÓWNAWCZE - PODSUMOWANIE

Wymagana trwałość dla zakładanej kategorii ruchu KR4:
2,5-7,3 mln osi 100kN/pas/20lat



Układ warstw konstrukcyjnych:

- Warstwa ścieralna z mastyksu grysowego (SMA) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C
- Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C
- Warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C
- Podbudowa pomocnicza z mieszanki niezwiązanej
- Warstwa mrozoochronna z gruntu niewysadzinowego
- Warstwa podłoża gruntowego G1

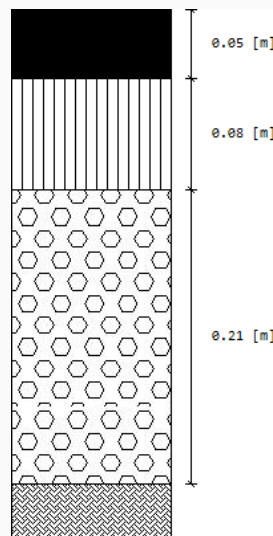
Trwałość zmęczeniowa Konstrukcji 1:

5 826 715 osi 100kN/pas/20lat

SPEŁNIA wymagania dla KR4

PODSUMOWANIE:

Trwałość zmęczeniowa **Konstrukcji nr 1** jest **większa** niż Konstrukcji nr 2



Układ warstw konstrukcyjnych:

- Warstwa ścieralna z mastyksu grysowego (SMA) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C
- Warstwa podbudowy zasadniczej z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C
- Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki mineralo-cementowo-emulsyjnej
- Warstwa podłoża gruntowego G1

Trwałość zmęczeniowa Konstrukcji 2:

3 366 147 osi 100kN/pas/20lat

SPEŁNIA wymagania dla KR4